Магнетополевая характеризация физических свойств двумерного электронного газа нитридных транзисторных гетероструктур с высокой подвижностью электронов

© Н.К. Чумаков[1], А.А. Андреев[1], И.В. Белов[1], Б.В. Гончаров[1], Ю.В. Грищенко[1], И.С. Езубченко[1], А.Б. Давыдов[2], М.Л. Занавескин[1], Е.М. Колобкова[1], Л.А. Моргун[2], С.Н. Николаев[1], К.Е. Приходько[1], И.А. Черных[1], С.Ю. Шабанов[1], В.Г. Валеев[1]

[1] НИЦ „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
[2] Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

E-mail: chumakov_nk@nrcki.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2025 г.
В окончательной редакции 23 июня 2025 г.
Принята к публикации 23 июня 2025 г.

Анализ магнитополевой зависимости магнетосопротивления и осцилляций Шубникова–де Гааза позволяет определить концентрацию носителей заряда, а также транспортную и квантовую подвижности двумерного электронного газа в нитридных транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур AlGaN/AlN/GaN в зависимости от температуры двумерного электронного газа и плотности электронов в нем. В отличие от стандартного холловского метода, требующего четырехконтактных измерений и дополнительных технологических процедур по созданию тестовых модулей, предложенная методика использует два контакта и позволяет сравнить параметры двумерного электронного газа в готовых транзисторах и в исходно синтезированных гетероструктурах.

Ключевые слова: нитридные транзисторы с высокой подвижностью электронов, двумерный электронный газ, эффект Шубникова–де Гааза.

DOI: 10.61011/FTP.2025.02.60982.7751

1. Введение

Нитридные транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур AlGaN/AlN/GaN получили широкое практическое применение в качестве базовых компонент устройств стабильной микроволновой электроники [1]. Однако поступательное развитие технологии их производства все еще затруднено отсутствием эффективных методов характеризации физических свойств основного рабочего элемента системы — двумерного электронного газа (2DEG) — в готовом HEMT. Дело в том, что на этой стадии стандартные гальваноманитные холловские методы измерений не позволяют определить ключевые параметры 2DEG, от которых существенным образом зависит качество продукта — плотность электронов 2DEG и их подвижность, не подвергая объекты изучения целому ряду весьма инвазивных технологических процедур с целью формирования в них холловских мостиков (Hall bars), хотя влияние происходящих при этом процессов на физические свойства 2DEG фактически неизвестно. Все это не позволяет установить вполне достоверную корреляцию между особенностями технологии синтеза HEMT и результатами ее применения, чем сильно сужает поле возможностей для ее развития.

В настоящей работе представлена методика характеризации электронных свойств 2DEG нитридных HEMT посредством анализа данных одного единственного эксперимента — двухконтактных измерений магнетосопротивления 2DEG в системе, основанного на хорошо известных результатах теоретического описания эффекта Шубникова–де Гааза [2,3]. В частности, зависимость магнетосопротивления образцов от температуры отражает температурную зависимость транспортной частоты релаксации $(1/\tau_{tr})$ электронов 2DEG, анализ периода осцилляций Шубникова–де Гааза, возникающих в полях $B \geq 7$ Тл, по параметру 1/B и наблюдаемых при температурах $T < 30$ K, позволяет найти плотность электронов 2DEG, а поведение их амплитуды как функции магнитного поля и температуры — исследовать температурную зависимость квантовой частоты релаксации $(1/\tau_q)$ электронов 2DEG. Наконец, результаты сравнительного анализа полученных данных о поведении транспортной и квантовой частот релаксации в системе (первая, в отличие от второй, как известно, не чувствительна к процессам малоуглового рассеяния электронов проводимости) содержат весьма полезную информацию не только о характере процессов упругого рассеяния носителей в исследуемом 2DEG, доминирующих в исследуемом диапазоне температур, но и о типе статических дефектов, которые их вызывают [3].

Весьма существенно, что в отличие от стандартных холловских процедур этот подход применим и для изуче-

ния гетероструктур с затвором, где провести измерения четырехконтактным методом невозможно.

2. Детали эксперимента

Двухзатворные транзисторы, исследованные в настоящей работе (см. рис. 1), сформированы на нитридных гетероструктурах отечественного производства, синтезированных методом MOCVD на кремниевых подложках Si(111) в ФТИ им. Иоффе. Особенности роста и состав гетероструктур, которые использовались для создания транзисторов, приведены на рис. 1 работы [4].

Габариты периферии затворов составляли 2×80, 2×120 и 2×180 мкм при расстоянии исток-сток и длине затвора, равных 4 и 0.25 мкм соответственно. Контакты к двумерному электронному газу изготовлены методом эпитаксиального доращивания нитрида галлия, легированного кремнием, с их последующей металлизацией. Пассивация структуры слоем нитрида кремния толщиной 500 нм осуществлялась методом PECVD. Истоки всех созданных на пластине транзисторов имеют контакт с металлизацией на нижней стороне подложки.

Электронная структура 2DEG гетероструктур HEMT детально изучена ранее (см. [5]): экспериментально — посредством холловских измерений и методами фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, теоретически — путем квантово-химических расчетов из первых принципов методом функционала плотности и численного решения уравнений Шредингера и Пуассона. При этом показано, что в электронном спектре 2DEG частично заполнены две нижние подзоны размерного квантования (QWS_1 и QWS_2), каждая из которых, как затем было установлено в работе [6], двукратно расщеплена спин-орбитальным взаимодействием.

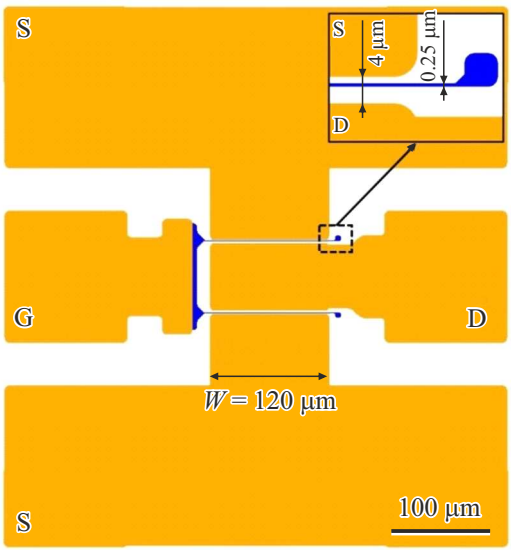

Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого HEMT. Все истоки имеют контакт с металлизацией на нижней стороне подложки.

Согласно данным [5], концентрация носителей в исследуемых гетероструктурах практически не меняется в интервале температур $T = 5-300$ K, а уменьшение сопротивления 2DEG с падением температуры обусловлено ростом подвижности носителей в основном вследствие уменьшения вклада электрон-фононных столкновений. Наконец, по данным того же источника заселенность верхней из двух частично заполненных зон размерного квантования, QWS_2, в ~ 20 раз меньше заселенности нижней, QWS_1.

Представленные результаты магнитотранспортных исследований системы в магнитных полях до 14 Тл, приложенных перпендикулярно плоскости 2DEG, в интервале температур 10–300 K, получены в ресурсном центре ЭФМ НИЦ „Курчатовский институт“; измерения сопротивления 2DEG при температурах от 10 мК в магнитном поле до 1 Тл проведены в ЦКП ФИАН им. П.Н. Лебедева. Сопротивление сток-исток HEMT измерялось двухконтактным методом. Магнитотранспорт в гетероструктурах без затвора исследован также в геометрии Ван дер Пау и в стандартной геометрии холловского креста.

3. Результаты и обсуждение

Температурная зависимость сопротивления сток-исток тестовой структуры (B120-4) представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведены магнетополевые зависимости сопротивления сток-исток двух транзисторов, сформированных на одной подложке (структуры A120-4 и B120-4). Зависимости $\Delta R_A = R_A(B) - R_A(B = 0)$ и $\Delta R_B = R_B(B) - R_B(B = 0)$ практически совпадают. Основной ход зависимости $R(B)$ подчиняется квадратичному закону, при низких температурах на этом фоне наблюдаются осцилляции Шубникова–де Гааза.

Как известно [7], в двумерном полупроводнике большого поперечного сечения с одним типом носителей, который по отношению к электронному транспорту эквивалентен диску Корбино, в интервале неквантующих магнитных полей выше области слабой локализации $\delta R(B)/R(0) \approx (\mu_{tr} B)^2$, где $\delta R(B) = R(B) - R(0)$, $\mu_{tr} = e\tau_{tr}/m^*$ — транспортная подвижность, а τ_{tr} — транспортное время релаксации электронов 2DEG. Фитинг кривых на рис. 3 полиномом второй степени позволяет определить величину μ_{tr}. В частности, при $T = 10$ K получим $\mu_{tr} = 3.76 \cdot 10^3$ см^2/(В · с), что с учетом уменьшения подвижности 2DEG с ростом температуры вполне согласуется с величиной типичной подвижности 2DEG гетероструктур без затвора при комнатной температуре, лежащей в пределах $1.5-2.0 \cdot 10^3$ см^2/(В · с). Наконец, для соответствующего транспортного времени релаксации электронов 2DEG получим: $\tau_{tr} \approx 4.3 \cdot 10^{-13}$ с.

На деталях анализа осцилляций Шубникова–де Гааза (рис. 4, *a*, *b*) следует остановиться более подробно. В работе [6], посвященной исследованию протя-

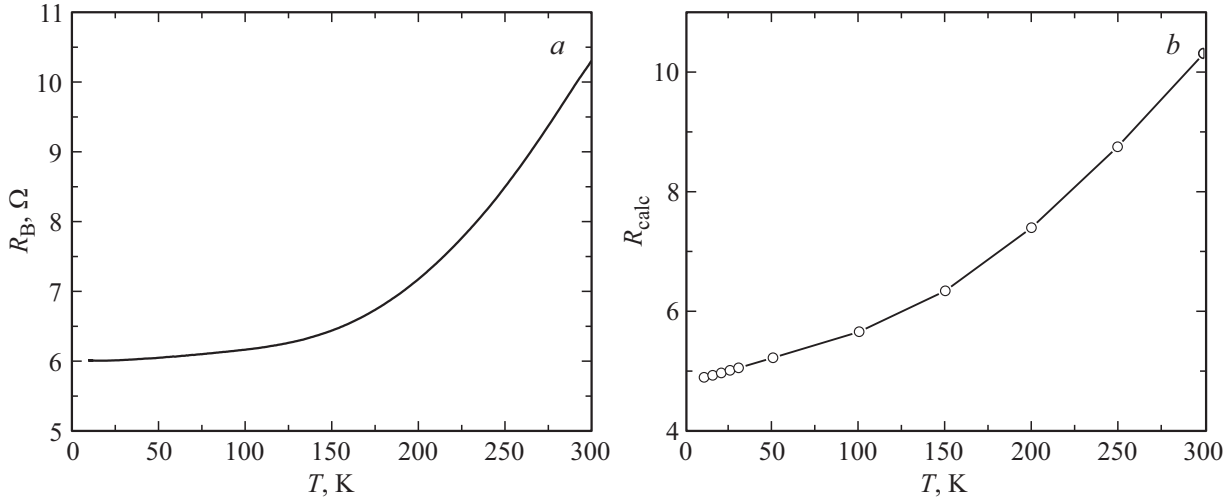

Рис. 2. *a* — температурная зависимость сопротивления сток-исток 2DEG структуры B120-4. *b* — сопротивление 2DEG, рассчитанное по температурной зависимости транспортной подвижности в предположении, что концентрация носителей 2DEG не зависит от температуры.

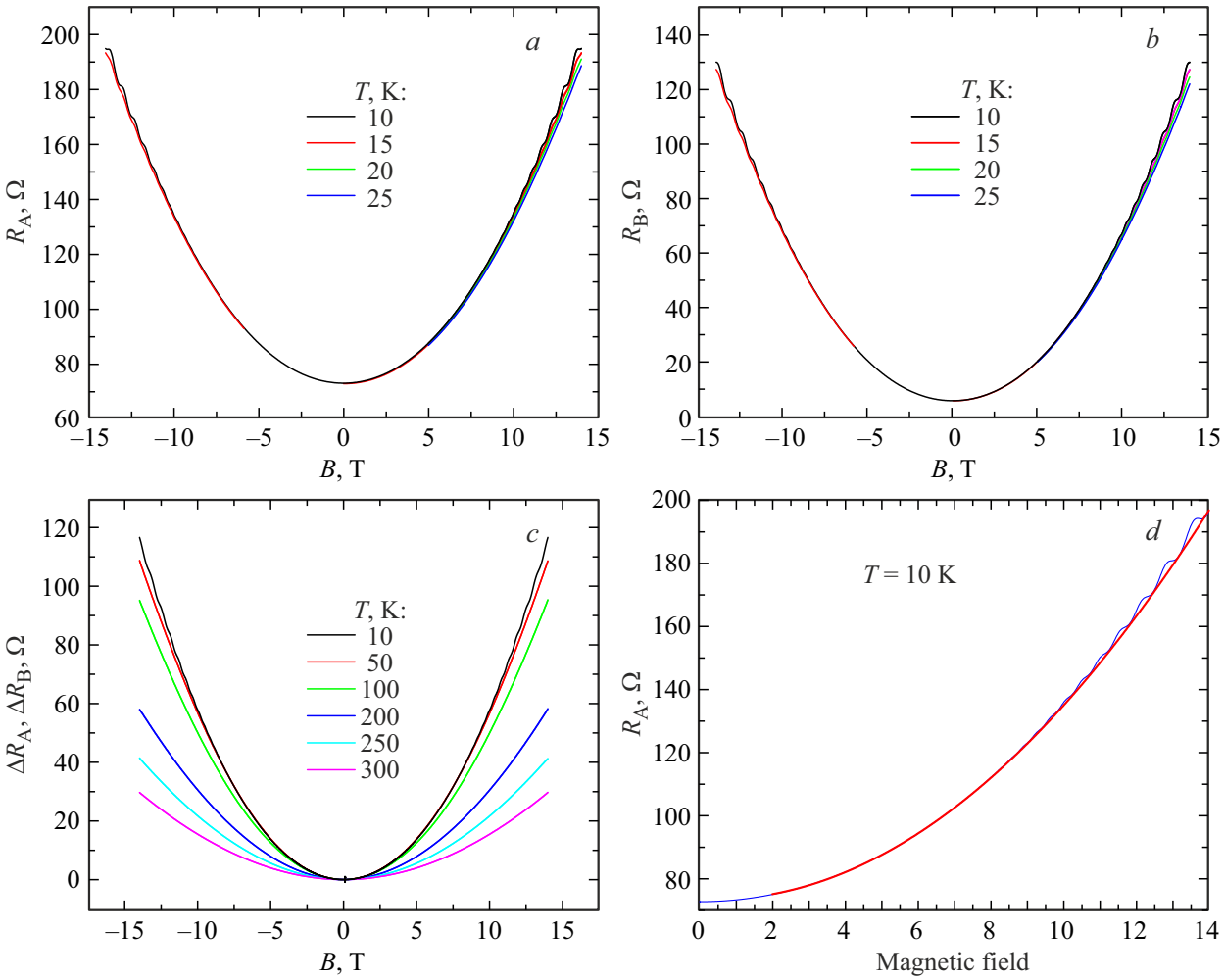

Рис. 3. Магнетополевые зависимости сопротивления сток-исток в транзисторе *a*) A120-4 и *b*) B120-4; исток соединен с затвором. *c* — зависимости $\Delta R_A = R_A(B) - R_A(B = 0)$ и практически совпадающие с ними $\Delta R_B = R_B(B) - R_B(B = 0)$. *d* — осцилляции Шубникова–де Гааза на фоне основного хода зависимости $R_A(B)$.

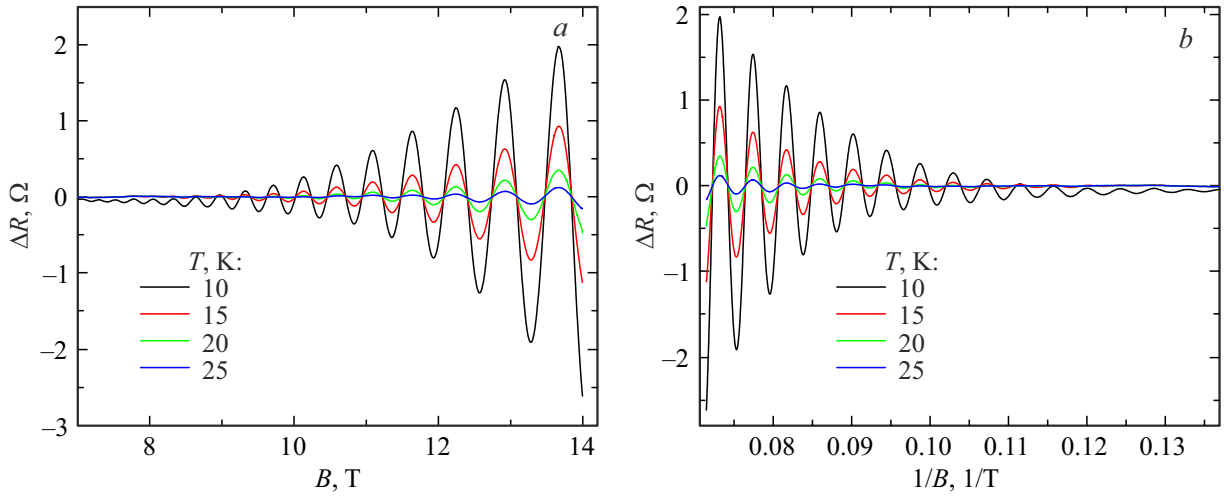

Рис. 4. *a* — магнетосопротивление 2DEG за вычетом основного хода, ΔR(B). *b* — зависимость $\Delta R(1/\mathrm{B})$, осцилляции Шубникова–де Гааза (оба графика для образца B120-4).

женных и узких холловских мостиков, изготовленных из гетероструктур, на основе которых выращены изучаемые здесь HEMT, показано, что: *a*) осцилляции Шубникова–де Гааза в их магнетосопротивлении анизотропны и представляют собой суперпозицию двух пар вкладов, отвечающих двум частично заполненным подзонам размерного квантования QWS_1 и QWS_2, каждый из которых двукратно расщеплен спин-орбитальным взаимодействием, и *b*) при усреднении их магнетосопротивления по углу 120° „выживает“ лишь нерасщепленный по спину вклад нижней подзоны, QWS_1, что позволяет определить ее вклад в плотность электронов 2DEG. Формальная причина этого результата, обсуждение которой выходит за рамки настоящей работы, по-видимому, обусловлена симметрией 2DEG и нетривиальными геометрическими свойствами его зонной структуры.

Система, исследуемая в настоящей работе, в реальном пространстве представляет собой короткий от истока к стоку и относительно широкий в поперечнике прямоугольник 2DEG, и эквивалентность ее геометрии диску Корбино подтверждается, в частности, параболической зависимостью ее магнетосопротивления от величины внешнего магнитного поля (рис. 3). Это последнее, в частности, означает, что осцилляции Шубникова–де Гааза (рис. 4, *a*, *b*) есть, по сути, результат усреднения магнетосопротивления исследуемого здесь 2DEG по углам в плоскости интерфейса, и в свете упомянутого выше результата работы [6] позволяет найти вклад QWS_1 в плотность электронов 2DEG, который в пределах погрешности настоящего эксперимента практически и определяет в нем полную плотность электронов.

Таким образом, стандартный расчет по данным рис. 4, *b* о частоте колебаний магнетосопротивления как функции 1/B дает плотность электронов исследуемого 2DEG: $n \approx 1.20 \cdot 10^{13}\,\mathrm{см}^{-2}$.

Следует подчеркнуть, что анализ осцилляций Шубникова–де Гааза (рис. 4, *b*) позволяет найти не только плотность электронов 2DEG, но и их квантовую подвижность даже в готовых HEMT, в отличие от стандартных холловских методов, без оговорок применимых лишь для исследования гетероструктур AlGaN/AlN/GaN без затвора и требующих четырехконтактных измерений. Действительно, поведение амплитуды осцилляций Шубникова–де Гааза в магнитном поле $\Delta R_{\mathrm{ampSdG}}$ (B), как известно, обусловлено упругим рассеянием носителей заряда на статических дефектах системы. В логарифмическом масштабе зависимость $\Delta R_{\mathrm{ampSdG}}$ (1/B) имеет при этом форму прямой (рис. 5), модуль наклона которой к оси абсцисс есть $\pi m^*/e\tau_q = \pi/\mu_q$, где τ_q — квантовое время релаксации электронов 2DEG, μ_q — их квантовая подвижность. Так что в нашем случае (см. рис. 5), например, при $T = 10\,\mathrm{K}$ получим $\mu_q \approx 420\,\mathrm{см}^2/(\mathrm{B}\cdot\mathrm{c})$ и, соответственно, $\tau_q \approx 4.8 \cdot 10^{-14}\,\mathrm{c}$.

Как мы видим, квантовая частота релаксации электронов проводимости в исследуемом 2DEG на порядок превосходит частоту релаксации их импульса. Последнее означает, что основным механизмом упругого рассеяния электронов 2DEG в системе является малоугловое рассеяние, характерное, в частности, для их движения в дальнодействующем потенциале ионизованных примесей, статических дефектов решетки с отличным от нуля дипольным моментом, дислокаций и (или) границ зерен в области локализации 2DEG, в отличие от рассеяния электронов на нейтральных точечных дефектах или на несовершенствах интерфейса, которое, как известно, является изотропным (см., например, гл. 23 [3]).

Более детальный сравнительный анализ всего массива данных, которые позволяет получить применяемая здесь методика, включая температурные зависимости времен релаксации и их зависимости от плотности электронов 2DEG, с результатами модельных расчетов, по-

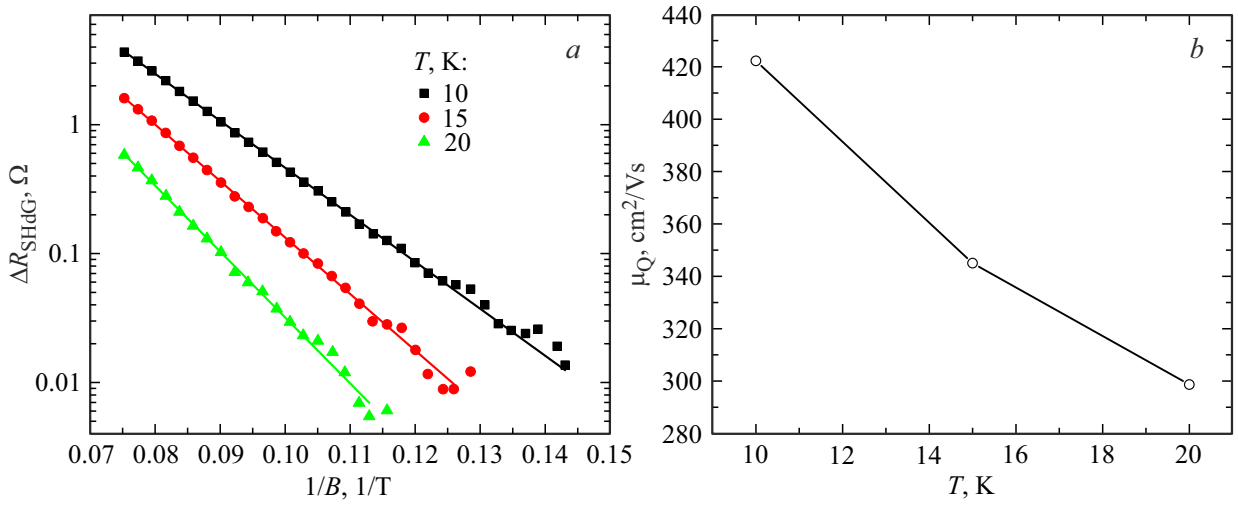

Рис. 5. *a* — магнитополевая зависимость амплитуды осцилляций Шубникова–де Гааза при разных температурах в структуре B120-4. *b* — соответствующая температурная зависимость квантовой подвижности электронов 2DEG.

видимому, даст возможность прийти к большей определенности в этом вопросе.

4. Заключение

Показано, что данные о магнетосопротивлении 2DEG в области относительно слабых магнитных полей позволяют установить зависимость транспортной подвижности электронов от температуры и плотности электронов в 2DEG гетероструктур с затвором, а характеристики осцилляций Шубникова–де Гааза в системе — получить аналогичные сведения о квантовой подвижности электронов 2DEG и рассчитать плотность электронов в нем.

Диагностические возможности этой процедуры продемонстрированы здесь на примере анализа данных магнитотранспортных исследований 2DEG транзисторных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN на монокристаллическом кремнии с ориентацией (111).

Авторы полагают, что представленная методика может служить полезным инструментом анализа большого класса проводящих интерфейсов с высокой подвижностью электронов: в отличие от стандартных четырехконтактных холловских методов она применима к изучению широкого спектра параметров гетероструктур сложной геометрии, использует лишь два контакта, а потому не требует создания дополнительных тестовых измерительных модулей и позволяет сравнить параметры 2DEG в готовых транзисторах и в исходно синтезированных гетероструктурах.

Финансирование работы

Работа выполнена на оборудовании РЦ ЭФМ НИЦ „Курчатовский институт“ при поддержке РНФ (грант 23-29-00536) в части гальваномагнитных исследований и государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“ в части создания образцов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] A.F. Medjdoub, K. Iniewski (eds.). *Gallium nitride (GaN): physics, devices, and technology* (N.Y., CRC Press, 2016).
[2] D. Shoenberg. *Magnetic Oscillations in Metals* (Cambridge University Press, 2009).
[3] В.А. Кульбачинский. Физика наносистем (М., Физматлит, 2022), п. 5.1.1, с. 143.
[4] A.V. Sakharov, D.S. Arteev, E.E. Zavarin, A.E. Nikolaev, W.V. Lundin, N.D. Prasolov, M.A. Yagovkina, A.F. Tsatsulnikov, S.D. Fedotov, E.M. Sokolov, V.N. Statsenko. Materials, **16**, 4265 (2023). https://doi.org/10.3390/ma16124265
[5] L.L. Lev, I.O. Maiboroda, M.-A. Husanu, E.S. Grichuk, N.K. Chumakov, I.S. Ezubchenko, I.A. Chernykh, X. Wang, B. Tobler, T. Schmitt, M.L. Zanaveskin, V.G. Valeyev, V.N. Strocov. Nature Commun., **9** (1), 2653 (2018). https://doi.org/10.1038/s41467-018-04354-x
[6] N.K. Chumakov, A.A. Andreev, I.V. Belov, A.B. Davydov, I.S. Ezubchenko, L.L. Lev, L.A. Morgun, S.N. Nikolaev, I.A. Chernykh, S.Yu. Shabanov, V.N. Strocov, V.G. Valeyev. JETP Letters, **119** (8), 604 (2024). https://doi.org/10.1134/S0021364024600769
[7] A. Fowler, F. Fang, W. Howard, P.J. Stiles. Phys. Rev. Lett., **16** (20), 901 (1966). https://doi:10.1103/physrevlett.16.901

Редактор Г.А. Оганесян

Magnetic field characterization of physical properties of two-dimensional electron gas of nitride high electron mobility transistor heterostructures

N.K. Chumakov[1], A.A. Andreev[1], I.V. Belov[1], B.V. Goncharov[1], Yu.V. Grischenko[1], I.S. Ezubchenko[1], A.B. Davydov[2], M.L. Zanaveskin[1], E.M. Kolobkova[1], L.A. Morgun[2], S.N. Nikolaev[1], K.E. Prikhod'ko[1], I.A. Chernykh[1], S.Yu. Shabanov[1], V.G. Valeyev[1]

[1] National Research Center Kurchatov Institute,
123182 Moscow, Russia
[2] P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract Analysis of the magnetic field dependence of magnetoresistance and Shubnikov–de Haas oscillations allows us to determine the concentration of charge carriers, as well as temperature and electron density dependencies of the transport and quantum mobility of the two-dimensional electron gas in AlGaN/AlN/GaN high-electron-mobility transistor heterostructures. Unlike the standard Hall method, which requires 4-contact measurements and additional technological procedures for creating test modules, the proposed technique uses 2 contacts and allows to compare the two-dimensional electron gas parameters in finished high-electron-mobility transistors and in the initially synthesized heterostructures.